

Моисеев Роман Романович – e-mail: r.roman.moiseev.r@gmail.com; тел.: +79163710048; студент.

Поляков Евгений Сергеевич – e-mail: ysvidetel@gmail.com; тел.: +79163710048; студент.

Zinchenko Lyudmila Anatolyevna – Bauman Moscow State Technical University; e-mail: lyudmillaa@mail.ru; Moscow, Russia; phone: +79057299365; dr. of eng. sc.; professor.

Kazakov Vadim Vyacheslavovich – e-mail: kazakov-vadim-v@yandex.ru; phone: +79689369731; cand. of eng. sc.; senior lecturer.

Moiseev Roman Romanovich – e-mail: r.roman.moiseev.r@gmail.com; phone: +79163710048; student.

Polyakov Evgeny Sergeevich – e-mail: ysvidetel@gmail.com; phone: +79163710048; student.

УДК 621.371

DOI 10.18522/2311-3103-2024-2-109-121

Д.В. Семенихина, Я.А. Скотаренко

**ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ МЕТАПОВЕРХНОСТИ
КЛИНОВИДНОЙ ФОРМЫ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ РЕКОМЕНДАЦИЙ
ПО УПРАВЛЕНИЮ ОТРАЖЕННЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ КРЫЛА
ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА**

Целью исследования является оценка эффективности применения нелинейной метаповерхности на объекте клиновидной формы для управления отраженным от него электромагнитным полем. В исследовании нелинейная метаповерхность представляет собой двумерный упорядоченный массив, элементы которого, взаимодействуя с электромагнитным полем падающей волны, способны управлять амплитудой и фазой прошедшей и отраженной волн, позволяя таким образом управлять волновым фронтом. Задачей исследования является поиск и проверка метода анализа клиновидных структур с нелинейными нагрузками различной конфигурации. При решении задачи исследования, рассматривается модель задней кромки крыла летательного аппарата с продольными нелинейными нагрузками на обеих гранях. Исследуемые нелинейные элементы моделируются сосредоточенными нагрузками в зонах на поверхности задней кромки крыла летательного аппарата. Подбором параметров сосредоточенных нагрузок задается вид их нелинейности. Описывается метод численного анализа модели, основанный на решении задачи рассеяния и задачи излучения электромагнитного поля. Представлена пошаговая последовательность действий от создания объемной модели задней кромки крыла летательного аппарата, до задания параметров расчета и получения результатов. Приведены результаты моделирования задней кромки крыла летательного аппарата с различным числом нелинейных нагрузок, различным положением нагрузок относительно друг друга и от кромки, различными параметрами сосредоточенных нагрузок. Полученные результаты электродинамического моделирования позволяют сделать выводы относительно параметров нагрузок, их количества и расположения. Были исследованы различные комбинации нагрузок, а именно две, три и четыре нелинейных нагрузки на каждой грани. Результаты для идеально проводящего клина с двумя нагрузками, показали низкую эффективность в части возможности увеличения уровней кратных гармоник относительно уровня основной в рассеянном от структуры электромагнитном поле. Анализ клина с тремя нагрузками, показал возможность увеличения уровней кратных гармоник на 13 дБ в секторе углов $\pm 5^\circ$. Стабильное, в широкой полосе частот, увеличение уровня кратных гармоник на 13-23 дБ в секторе углов $\pm 80^\circ$ достигается при размещении на задней кромке крыла летательного аппарата четырех нагрузок.

Нелинейная метаповерхность; нелинейные нагрузки; возбуждение клина; задняя кромка крыла.

D.V. Semenikhina, Ya.A. Skotarenko

**NUMERICAL STUDIES OF A NONLINEAR WEDGE-SHAPED METASURFACE
FOR THE DEVELOPMENT OF RECOMMENDATIONS FOR CONTROL
OF THE REFLECTED ELECTROMAGNETIC FIELD OF AN AIRCRAFT WING**

The aim of the study is to evaluate the effectiveness of using a nonlinear metasurface on a wedge-shaped object to control the electromagnetic field reflected from it. In the study, a nonlinear meta-surface is a two-dimensional ordered array, the elements of which, interacting with the electromagnetic field of an

incident wave, are able to control the amplitude and phase of the transmitted and reflected waves, thus allowing the wavefront to be controlled. The task of the research is to find and verify a method for analyzing wedge-shaped structures with nonlinear loads of various configurations. When solving the researching task, a model of the trailing edge of a wing of an aircraft with longitudinal nonlinear loads on both sides is considered. The studied nonlinear elements are modeled by concentrated loads in zones on the surface of the trailing edge of the aircraft wing. By selecting the parameters of concentrated loads, the type of their nonlinearity is set. A method of numerical analysis of the model based on solving the scattering problem and the problem of electromagnetic field radiation is described. A step-by-step sequence of actions is presented from creating a three-dimensional model of the trailing edge of an aircraft wing, to setting calculation parameters and obtaining results. The results of modeling the trailing edge of an aircraft wing with a different number of nonlinear loads, different positions of loads relative to each other and from the edge, and different parameters of concentrated loads are presented. The obtained results of electrodynamic modeling allow us to do conclusions regarding the parameters of loads, their number and location. Various combinations of loads were investigated, notably two, three and four nonlinear loads on each face. The results for an ideally conducting wedge with two loads showed low efficiency in terms of the possibility of increasing the levels of multiple harmonics relative to the main level in an electromagnetic field scattered from the structure. The analysis of a wedge with three loads showed the possibility of increasing the levels of multiple harmonics by 13 dB in the $\pm 5^\circ$ angle sector. Stable, in a wide frequency band, an increase in the level of multiple harmonics by 13-23 dB in the $\pm 80^\circ$ angle sector is achieved when four loads are placed on the trailing edge of the aircraft wing.

Nonlinear metasurface; nonlinear loads; wedge excitation; wing trailing edge.

Введение. В исследовании рассматривается нелинейная метаповерхность (МП). Метаповерхность – это электромагнитная структура, представляющая собой двумерный упорядоченный массив из элементов субволновых размеров, которые, взаимодействуя с электромагнитным полем (ЭМП) падающей волны, способны управлять амплитудой, фазой и поляризацией прошедшей и отраженной волн, осуществляя таким образом полный контроль над волновым фронтом [1]. Метаповерхности обладают такими свойствами, как электромагнитная прозрачность и маскировка [2], поглощение [3, 4] и др.

В исследовании возможность управления ЭМП основывается на эффекте нелинейного рассеяния (ЭНР), который был открыт в середине прошлого века [5]. Согласно исследованиям ЭНР [6] установили, что электромагнитная энергия мощных передатчиков при падении на объекты искусственного происхождения порождает в спектре рассеянного поля комбинационные и гармонические частотные составляющие. Основными естественными источниками ЭНР являются оксиды, например, оксид железа (Fe_2O_3).

Следует отметить, что в большей мере, чем естественные источники, нелинейное рассеяние порождают полупроводниковые элементы, такие как диоды, транзисторы, смесители и т.п. Полупроводниковые элементы отличаются видом нелинейности [7], это обусловлено разной технологией производства.

Многие физические явления в природе описываются линейными математическими моделями, однако протекающие в них процессы, как правило сложнее и должны содержать нелинейные члены [8].

Потребность в построении нелинейных моделей возникает в связи с тем, что процессы, протекающие в определённых условиях, имеют нелинейный характер. Их не получается описать линейными уравнениями, в тоже время они представляют научный интерес, так как возможно позволят найти полезные применения [9, 10].

Целью исследования является разработка метода оценки применения нелинейных нагрузок (НН) на обеих гранях задней кромки крыла летательного аппарата (ЛА), для решения задачи рассеяния электромагнитных волн (ЭМВ) подобными [11–13] структурами.

Обоснование выбора модели задней кромки крыла летательного аппарата. Большой научно-прикладной интерес представляет решение задачи дифракции ЭМВ на объектах сложной формы в так называемых центрах рассеяния («блестящих точках») [14], которые вносят основной вклад в отраженное объектом ЭМП. Частным случаем таких точек у ЛА выступают, например, клиновидные грани задних кромок крыльев (ЗКК), кромок рулей курсовой устойчивости (киля) и т.д. [15].

Для управления ЭМП ЛА в задней полусфере используется метод внедрения нелинейной метаповерхности в области ЗКК. Суть метода заключается в использовании эффекта нелинейного рассеяния [16], для переноса энергии рассеянного объектом ЭМП с основной частоты на частоты гармоник. За счет нелинейных свойств метаповерхности, должен обеспечиваться минимальный уровень сигнала на частоте основной гармоники и максимальный на кратных частотах. Нелинейная МП представляет собой конформный двумерный материал периодической структуры с включениями нелинейных элементов (диоды, варикапы и т.д.) [17]. Конформными называют метаповерхности, которые повторяют геометрию тела, на котором должны быть установлены.

Размеры модели задней кромки крыла ЛА были выбраны следующие [18, 19] (рис. 1):

- ◆ длина торца клина составляет 100 мм;
- ◆ длина клина до сопряжения с цилиндром 200 мм;
- ◆ угол раскрытия клина равен $\pi/6$.

Рабочий диапазон частот выбирается исходя из стандартных диапазонов средств радиолокации. Исходя из этих соображений, был выбран диапазон частот 3-9 ГГц (для основной частоты).

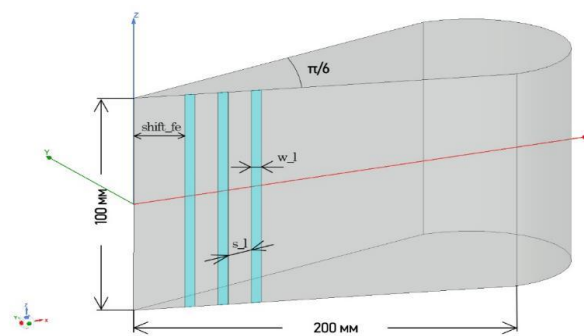


Рис. 1. Исследуемая модель задней кромки крыла ЛА

Постановка задачи. Конструкция задней кромки крыла ЛА. Задачу численного исследования задней кромки крыла ЛА можно разделить на два этапа. Первый этап – это решение задачи рассеяния, второй этап – решение задачи излучения.

На первом этапе выполняется оценка влияния плоской падающей электромагнитной волны на возбуждаемые токи, поиск минимального и максимального значения поля. На втором этапе задаются токи в виде портов возбуждения в области сосредоточенной нагрузки, например, на первой нагрузке, остальные нагрузки при этом задаются как сосредоточенная нагрузка (нагрузка с R , L , C параметрами, где R – сопротивление, L – индуктивность и C – ёмкость).

Была разработана линейная модель ЗКК, показанная на рисунке 1. Модель представляет собой электродинамическую структуру в виде бесконечного идеально проводящего клина длиной $length_w = 200$ мм, шириной $width_w = 100$ мм, углом раскрытия 30° . Задача решалась методом конечных элементов в среде численного электродинамического моделирования Ansys HFSS, которая позволяет решать только линейные задачи, поэтому нелинейные нагрузки будем аппроксимировать нагрузками с сосредоточенными параметрами R , L , C . Сосредоточенная нагрузка представляет собой колебательный RLC – контур с импедансными граничными условиями [20]:

$$E_{tan} = Z_s(\hat{n} \times H_{tan}), \quad (1)$$

где $\hat{n}$ – единичный вектор, перпендикулярный поверхности; E_{tan} – составляющая электрического поля, касательная к поверхности; H_{tan} – составляющая магнитного поля, касательная к поверхности;

$Z_s = R_s + jX_s$ – поверхностный импеданс, где R_s – активное сопротивление в Омах на квадрат, а X_s – реактивное сопротивление.

Параметры сосредоточенной нагрузки подбираются таким образом, чтобы обеспечить максимум и минимум поля на исследуемой частоте.

Нагрузки расположены на *shift_fe* расстоянии от кромки клина до первой нагрузки, а расстояние между нагрузками *s_l*, при этом ширина нагрузок *w_l*. Модель возбуждается плоской падающей волной с частотой ω . Необходимо исследовать характеристики ЭМП заданной структуры в зависимости от параметров нагрузок. Целью исследования является выбор параметров сосредоточенной нагрузки и её положения на клине, обеспечивающих за счет пространственного резонанса наибольшее отношение компонент векторов напряженностей полей в точке наблюдения, определяемых на кратных частотах 2ω , 3ω .

Считаем, что клин является идеально проводящим. Условия периодичности (граничные условия Master-Slave) на боковых гранях границы задачи устанавливаем для указания бесконечности клина (рис. 2,а). На остальной части модели устанавливаем граничные условия излучения на бесконечности (Radiation Boundary). Возбуждение клина происходит плоской падающей волной (Plane Wave), перпендикулярной ребру клина, (рис. 2,б).

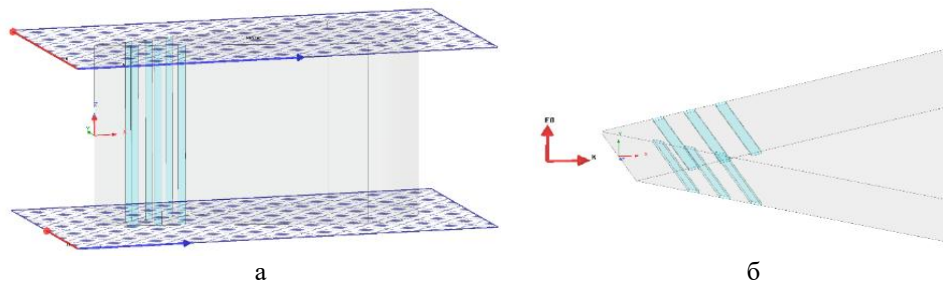


Рис. 2. Исследуемая модель задней кромки крыла ЛА указание: а – граничных условий и б – условий возбуждения плоской падающей волной (Plane Wave)

За источник возбуждения ЭМП на частоте второй гармоники 2ω примем сосредоточенный порт (Lumped Port), который будет моделировать излучение на частотах гармоник. Решая параметрическую задачу, будем искать такие параметры L и C , при которых происходит возбуждение и резонанс. Для предварительной оценки значений L и C выполним расчет резонанса для параллельного колебательного контура (КК), используем известную формулу [21] для нахождения резонансной частоты:

$$\omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \quad (2)$$

где L – ёмкость, C – индуктивность КК.

Полученные по формуле 2 значения ёмкости и индуктивности будем задавать в параметрах (L , C) сосредоточенной нагрузки.

Анализ характеристик ЭМП идеально проводящего клина с нагрузками. На первом этапе решается задача рассеяния, структура облучается плоской падающей волной на частоте 3 ГГц. Параметры, описывающие положения нагрузок, варьируются, и выполняется оценка отраженного поля. На рис. 3 и 4 представлены зависимости поля от положения нагрузок на клине и расстоянии между нагрузками.

После нахождения параметров расположения нагрузок, при которых получается минимум поля, выполняем анализ влияния параметров R , L и C сосредоточенных нагрузок. Результаты изменения поля в зависимости от значений ёмкости и индуктивности представлены на рис. 5 и 6.

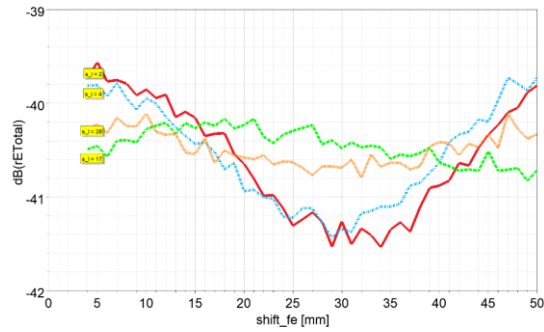


Рис. 3. Полное поле (дБ) в зависимости от положения нагрузок на клине $shift_fe$ (мм) и расстояния между нагрузками s_l (мм)

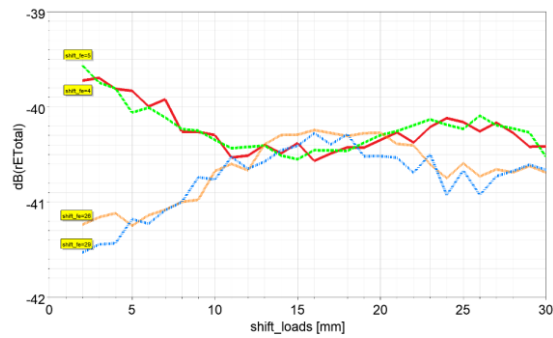


Рис. 4. Полное поле (дБ) в зависимости от расстояния между нагрузками s_l (мм) и положения нагрузок на клине $shift_fe$ (мм)

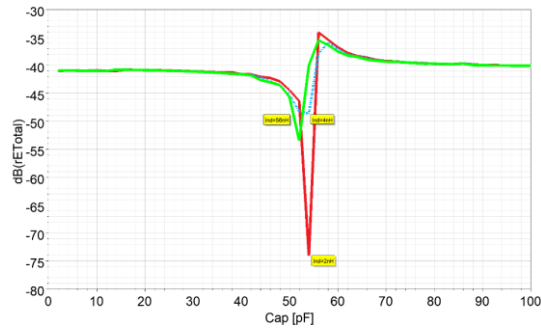


Рис. 5. Полное поле (дБ) в зависимости от ёмкости нагрузки Cap (пФ)

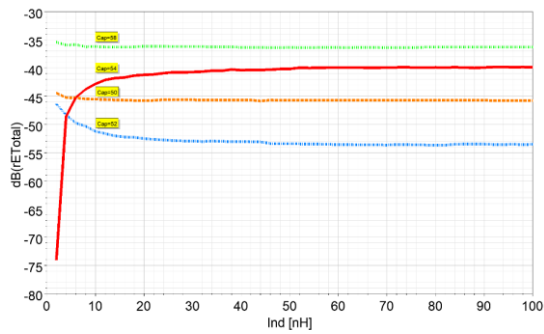


Рис. 6. Полное поле (дБ) в зависимости от индуктивности нагрузки Ind (нГн)

Находим резонансные значения емкости и индуктивности для частоты 3 ГГц: $C_{ap}=54$ пФ, $Ind=2$ нГн, при которых наблюдаем уменьшение поля в обратном падающей волне направлении относительно эталона на 33,5 дБ (рис. 7).

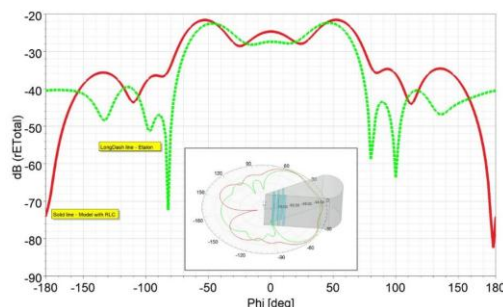


Рис. 7. Полное поле (дБ) в зависимости от параметров нагрузки (C_{ap} , Ind):
красная сплошная линия – клин с нагрузками;
зеленая пунктирная линия – эталон (только клин)

На втором этапе решается задача возбуждения на частоте второй гармоники 2ω (6 ГГц). За основу взята модель из первого этапа. Вместо первой от кромки клина нагрузки, на каждой грани устанавливается порт возбуждения (Lumped Port) (рис. 8).

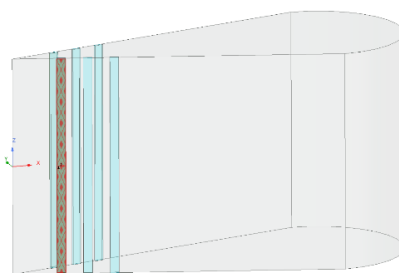


Рис. 8. Модель задачи возбуждения, порт возбуждения выделен красным цветом

Результаты расчета полного поля для частоты 6 ГГц представлены на рис. 9. Наблюдаем увеличение поля на 12 дБ, что подтверждает переход энергии с основной частоты на вторую гармонику. Полученные результаты позволяют оценить эффективность управления характеристиками рассеяния исследуемого объекта для конкретных конфигураций нагрузок.

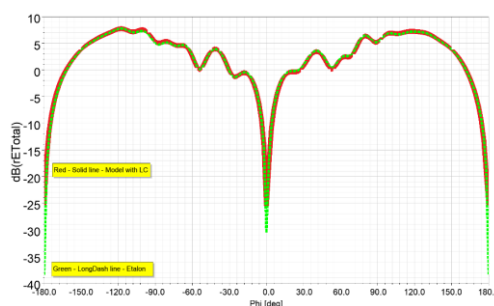


Рис. 9. Полное поле (дБ) от угла Φ на удвоенной частоте (6 ГГц):
красная сплошная линия - клин с нагрузками и портами возбуждения;
зеленая пунктирная линия – эталон (только порты возбуждения, без нагрузок)

Далее повторяем проделанные действия для разного числа нагрузок на клине.

Анализ модели клина с двумя нагрузками. Исследуем модель с двумя нагрузками (рис. 10), решим сначала задачу рассеяния.

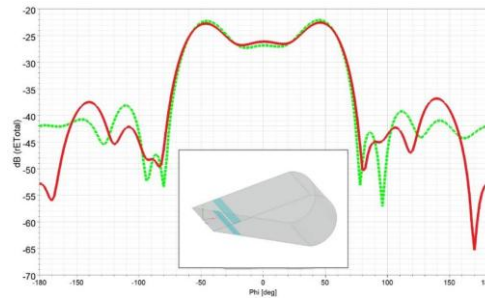


Рис. 10. Полное поле (дБ) в зависимости от параметров нагрузки (Cap, Ind):
красная сплошная линия - клин с нагрузками;
зеленая пунктирная линия – эталон (только клин)

На рис. 10 представлены результаты снижения поля для случая, когда на кромке клина установлено две нагрузки. Разница уровня полного поля между эталоном и моделью с нагрузками составляет 10 дБ.

Затем исследуем задачу возбуждения для модели с двумя нагрузками.

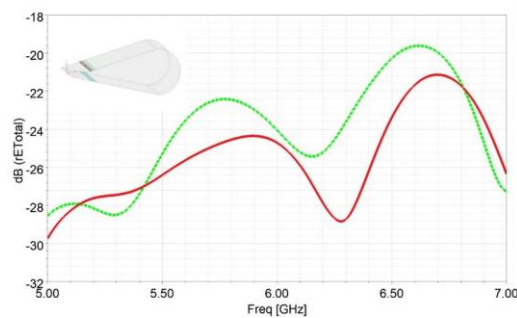


Рис. 11. Полное поле (дБ) в зависимости от частоты анализа для:
красная кривая – клин с нагрузками и источником на первой нагрузке,
зеленая кривая – эталон (только клин с источником на первой нагрузке)

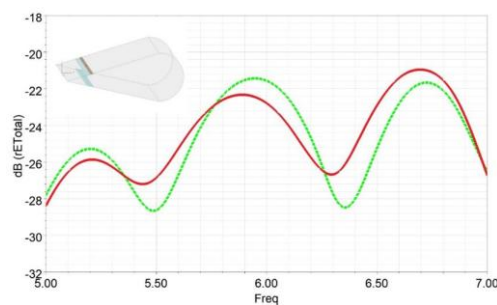


Рис. 12. Полное поле (дБ) в зависимости от частоты анализа для:
красная кривая – клин с нагрузками и источником на второй нагрузке,
зеленая кривая – эталон (только клин с источником на второй нагрузке)

Исследование модели с двумя нагрузками (см. рис. 11, 12), показали невысокую эффективность в части возможности увеличения уровней кратных гармоник относительно уровня основной в рассеянном от структуры ЭМП. В основном вся энергия на кратных частотах плавно распределяется по частотам и не даёт существенного увеличения уровня ЭМП.

Анализ моделей клина с тремя и четырьмя нагрузками. Аналогичным образом исследуем модели с тремя и четырьмя нагрузками.

В случае трех нагрузок (рис. 13) максимального снижения уровня поля на основной частоте удалось добиться при следующих параметрах нагрузки: при $\text{shift_fe}=20$ мм, $\text{shift_loads}=8$ мм, $\text{Cap}=54$ пФ, $\text{Ind}=2$ нГн.

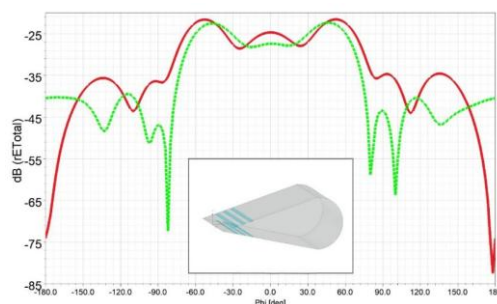


Рис. 13. Полное поле (дБ) от угла Φ на частоте 3 ГГц, при $\text{shift_fe}=20$ мм, $\text{shift_loads}=8$ мм, $\text{Cap}=54$ пФ, $\text{Ind}=2$ нГн: красная сплошная линия – клин с нагрузками; зеленая пунктирная линия – эталон (только клин)

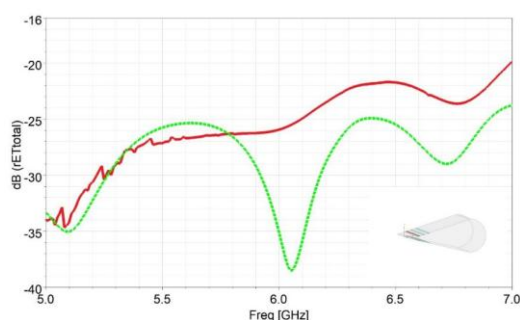


Рис. 14. Полное поле (дБ) в зависимости от частоты анализа для: красная кривая – клин с нагрузками и источником на первой нагрузке, зеленая кривая – эталон (только клин с источником на первой нагрузке)

Исследовались три модели с тремя нагрузками, одна из которых замещалась на источник (см. рис. 14-16). Расчеты показали эффективность в конфигурации, когда источник возбуждения находится на первой нагрузке. Для этого случая максимальное увеличение поля составляет 13 дБ на частоте 6,06 ГГц и 9 дБ на частоте 6 ГГц (см. рис. 14).

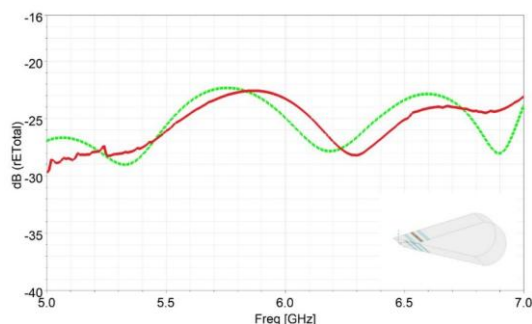


Рис. 15. Полное поле в зависимости от частоты анализа для: красная кривая – клин с нагрузками и источником на второй нагрузке, зеленая кривая – эталон (только клин с источником на второй нагрузке)

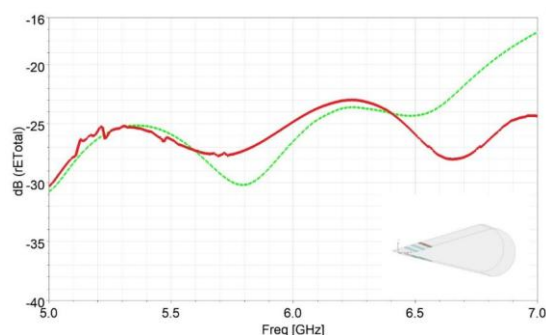


Рис. 16. Полное поле (дБ) в зависимости от частоты анализа для:
красная кривая – клин с нагрузками и источником на третьей нагрузке,
зеленая кривая – эталон (только клин с источником на третьей нагрузке)

Анализ модели с четырьмя нагрузками показал возможность снижения уровня поля на основной частоте на 52 дБ (рис. 17). Этого удалось добиться при следующих параметрах нагрузки: при $shift_fe=27$ мм, $shift_loads=2$ мм, $Cap=48$ пФ, $Ind=8$ нГн.

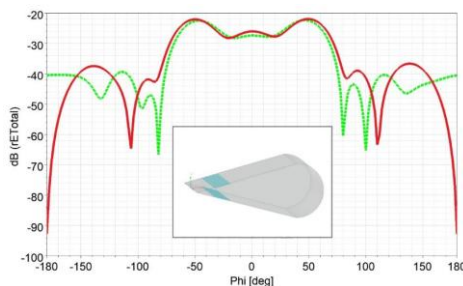


Рис. 17. Полное поле (дБ) в зависимости от угла Φ : для четырёх нагрузок на частоте 3 ГГц для $shift_fe=27$ мм, $shift_loads=2$ мм: красная сплошная линия – клин с нагрузками;
зеленая пунктирная линия – эталон (только клин)

Исследование моделей с четырьмя нагрузками показали эффективность в конфигурации, когда источник возбуждения находится на второй нагрузке, как видно из сравнения результатов решения задач возбуждения (рис. 18-21). В данной конфигурации наблюдается увеличение уровня поля на кратных гармониках в широкой полосе частот.

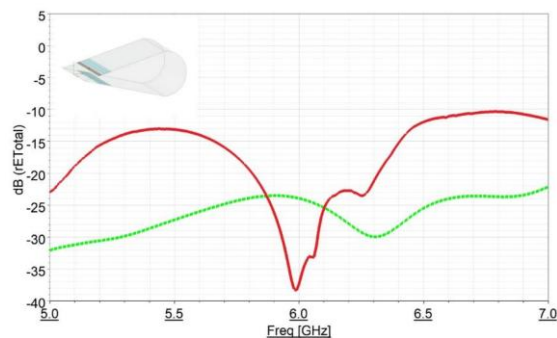


Рис. 18. Полное поле (дБ) в зависимости от частоты анализа для:
красная кривая – клин с нагрузками и источником на первой нагрузке,
зеленая кривая – эталон (только клин с источником на первой нагрузке)

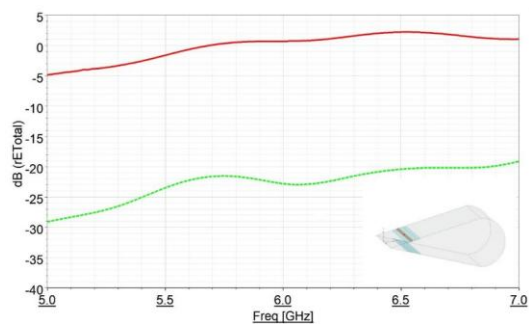


Рис. 19. Полное поле (дБ) в зависимости от частоты анализа для: красная кривая – клин с нагрузками и источником на второй нагрузке, зеленая кривая – эталон (только клин с источником на второй нагрузке)

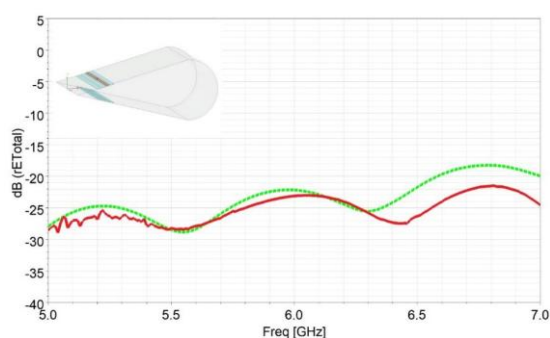


Рис. 20. Полное поле (дБ) в зависимости от частоты анализа для: красная кривая – клин с нагрузками и источником на третьей нагрузке, зеленая кривая – эталон (только клин с источником на третьей нагрузке)

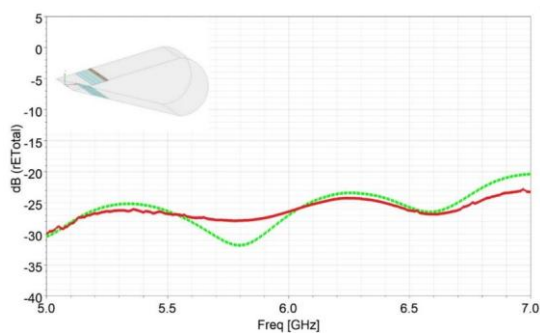


Рис. 21. Полное поле (дБ) в зависимости от частоты анализа для: красная кривая – клин с нагрузками и источником на четвертой нагрузке, зеленая кривая – эталон (только клин с источником на четвертой нагрузке)

Выводы:

- ♦ в ходе электродинамического моделирования задачи найдены параметры нагрузок, при которых возникает пространственный резонанс;
- ♦ определены расположение нагрузок на клине и их количество, при которых обеспечивается увеличение относительного уровня гармонических составляющих;
- ♦ численные исследования идеально проводящего клина с двумя нагрузками, показали низкую эффективность в части возможности увеличения уровней кратных гармоник относительно уровня основной в рассеянном от структуры ЭМП. Так для задачи рас-

сеяния удалось добиться снижения уровня полного поля на основной частоте (3 ГГц), по сравнению с эталоном, в секторе углов $\pm 20^\circ$ всего на 10 дБ. Для задачи возбуждения на удвоенной частоте (6 ГГц), когда источник расположен на первой от кромки клина нагрузке зафиксировано снижение уровня полного поля на 2 дБ, а когда источник расположен на второй нагрузке уровень полного поля относительно эталона не изменился;

♦ численные исследования идеально проводящего клина с тремя нагрузками, показали возможность увеличения уровней кратных гармоник на 13 дБ в секторе углов $\pm 5^\circ$ относительно уровня основной в рассеянном от структуры ЭМП, при условии, что источник возбуждения расположен на первой нагрузке от кромки клина. Увеличение относительного уровня обеспечивается путём снижения уровня рассеяния на основной гармонике;

♦ численные исследования идеально проводящего клина с четырьмя нагрузками, показали возможность увеличения уровней кратных гармоник от 13 дБ до 23 дБ в секторе углов $\pm 80^\circ$ относительно уровня основной гармоники в рассеянном от структуры ЭМП, при условии, что источник возбуждения расположен на второй нагрузке от кромки клина. Увеличение относительного уровня обеспечивается путём снижения уровня рассеяния на основной гармонике;

♦ численный анализ модели клина с разным количеством нагрузок показал, что оптимальным вариантом, в исследуемом диапазоне частот, является использование четырех нагрузок, т.к. при этом обеспечивается стабильное увеличение уровня кратных гармоник на 13–23 дБ в широкой полосе частот.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Максимова А.Г., Одум М.А. Широкополосная поглощающая метаповерхность на основе воды. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ».
2. Bergmair I., [et al.]. Single and multiplayer metamaterials fabricated by nanoimprint lithography // Nanotechnology. – 2011. – 22. – P. 325301.
3. Watts C.M., [et al.]. Metamaterial, Electromagnetic Wave Absorbers // Advanced materials. – 2012. – Vol. 24.
4. Wen Q.-Y., [et al.]. Perfect Metamaterial Absorbers in Microwave and Terahertz Bands // Metamaterial. – 2012.
5. Eastman A., Horle L. The Generation of Spurious Signal by Nonlinearity of the Transmission Path // Proc. IRE. – 1940. – Vol. 28. – P. 438.
6. Штейншленгер В.Б., Мисежников Г.С. Исследование эффекта нелинейного рассеяния радиоволн металлическими объектами // Радиотехника и электроника. – 1984. – Т. 39. – Вып. 6. – С. 902-906.
7. Величко Д.В., Рубанов В.Г. Полупроводниковые приборы и устройства: учеб. пособие. – Белгород: Политекра, 2006. – 184 с.
8. Oleksandr Malyskin and Vincent Fusco. Combined Frequency-Time Domain Analysis of FSS with Nonlinear Loads Using Volterra Integral Equations, ECIT Institute, Queens University of Belfast Queens Rd, Queens Island, Belfast BT3 9DT, N. Ireland.
9. Liao D. Scattering and Imaging of Nonlinearly Loaded Antenna Structures in Half-Space Environments // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2014. – 62 (8). – P. 4230-4240. – DOI: 10.1109/tap.2014.2322875.
10. Chien-Chang Huang, & Tah-Hsiung Chu. Analysis of wire scatterers with nonlinear or time-harmonic loads in the frequency domain // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1993. – 41 (1). – P. 25-30. – DOI: 10.1109/8.210111.
11. Zhu Z.-W.*, Chen H.-Y., Zhang H.-B., Zhou P.-H., Deng L.-J., and Xie J.-L. Patterned resistive strip loading for edge scattering suppression of a finite wedge // Progress in Electromagnetics Research M. – 2012. – Vol. 25. – P. 27-38.
12. Jacques Periaux, Mourad Sefrioui, Bertrand Mantel. RCS multi-objective optimization of scattered waves by active control elements using Gas, Dassault Aviation. 78 Quai Marcel Dassault, 92214 SaintCloud, France.
13. Knott E.F. Suppression of edge scattering with impedance strings // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1997. – 45 (12). – P. 1768-1773. – DOI: 10.1109/8.650194.
14. Семенихина Д.В., Юханов Ю.В., Привалова Т.Ю. Теоретические основы радиоэлектронной борьбы: учеб. пособие. – Таганрог, 2009. – 266 с.
15. Геворкян А.В. Гашение полей рассеяния объектов системой антенн Вивальди: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.07. – Таганрог, 2016. – 226 с.

16. Семенikhина Д.В. Анализ эффекта нелинейного рассеяния электромагнитных волн // Электродинамика и техника СВЧ и КВЧ. – 1998. – Т. 6, № 1-2 (21). – С. 119-126.
17. Sievenpiper D.F. Nonlinear Grounded Metasurfaces for Suppression of High-Power Pulsed RF Currents // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2011. – 10. – P. 1516-1519. – DOI: 10.1109/lawp.2011.2182593.
18. Zhu Z-W, Chen H-Y, Zhang H-B, Zhou P-H, Deng L-J, Xie J-L. Patterned resistive strip loading for edge scattering suppression of a finite wedge // Prog. Electromagn. Res. M. – 2012. – 25. – P. 27-38.
19. Цихош Э. Сверхзвуковые самолеты: Справочное руководство: пер. с польск. – М.: Мир, 1983. – 432 с.
20. Марков Г.Т., Чаплин А.Ф. Возбуждение электромагнитных волн. – М.: Изд-во Радио и связь, 1983. – 296 с.
21. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Изд-во «Высшая школа», 2000. – 459 с.

REFERENCES

1. Maksimova A.G., Odit M.A. Shirokopolosnaya pogloshchayushchaya metapoverkhnost' na osnove vody [Broadband observable metasurface based on water]. St. Petersburg: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy elektrotekhnicheskiiy universitet «LETI».
2. Bergmair I., [et al.]. Single and multiplayer metamaterials fabricated by nanoimprint lithography, *Nanotechnology*, 2011, 22, pp. 325301.
3. Watts C.M., [et al.]. Metamaterial, Electromagnetic Wave Absorbers, *Advanced materials*, 2012, Vol. 24.
4. Wen Q.-Y., [et al.]. Perfect Metamaterial Absorbers in Microwave and Terahertz Bands, *Metamaterial*, 2012.
5. Eastman A., Horle L. The Generation of Spurious Signal by Nonlinearity of the Transmission Path, *Proc. IRE*, 1940, Vol. 28, pp. 438.
6. Shteynshlenger V.B., Mizezhnikov G.S. Issledovanie effekta nelineynogo rasseyaniya radiovoln metallichesкими ob'ektami [Study of the effect of nonlinear scattering of radio waves by metal objects], *Radiotekhnika i elektronika* [Radio engineering and electronics], 1984, Vol. 39, Issue 6, pp. 902-906.
7. Velichko D.V., Rubanov V.G. Poluprovodnikovye pribory i ustroystva: ucheb. posobie [Semiconductor devices and devices: textbook]. Belgorod: Politeria, 2006, 184 p.
8. Oleksandr Malyskin and Vincent Fusco. Combined Frequency-Time Domain Analysis of FSS with Nonlinear Loads Using Volterra Integral Equations, ECIT Institute, Queens University of Belfast Queens Rd, Queens Island, Belfast BT3 9DT, N. Ireland.
9. Liao D. Scattering and Imaging of Nonlinearly Loaded Antenna Structures in Half-Space Environments, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62 (8), pp. 4230-4240. DOI: 10.1109/tap.2014.2322875.
10. Chien-Chang Huang, & Tah-Hsiung Chu. Analysis of wire scatterers with nonlinear or time-harmonic loads in the frequency domain, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1993, 41 (1), pp. 25-30. DOI: 10.1109/8.210111.
11. Zhu Z.-W.*, Chen H.-Y., Zhang H.-B., Zhou P.-H., Deng L.-J., and Xie J.-L. Patterned resistive strip loading for edge scattering suppression of a finite wedge, *Progress in Electromagnetics Research M*, 2012, Vol. 25, pp. 27-38.
12. Jacques Periaux, Mourad Sefrioui, Bertrand Mantel. RCS multi-objective optimization of scattered waves by active control elements using Gas, Dassault Aviation. 78 Quai Marcel Dassault, 92214 SaintCloud, France.
13. Knott E.F. Suppression of edge scattering with impedance strings, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1997, 45 (12), pp. 1768-1773. DOI: 10.1109/8.650194.
14. Semenikhina D.V., Yukhanov Yu.V., Privalova T.Yu. Teoreticheskie osnovy radioelektronnoy bor'by: ucheb. posobie [Theoretical foundations of electronic warfare. learning materials]. Taganrog, 2009, 266 p.
15. Gevorkyan A.V. Gashenie poley rasseyaniya ob'ektov sistemoy antenn Vival'di: dis. ... kand. tekhn. nauk [Damping of scattering fields of objects by Vivaldi antenna system: cand. of eng. sc. diss.]: 05.12.07. Taganrog, 2016, 226 p.
16. Semenikhina D.V. Analiz effekta nelineynogo rasseyaniya elektromagnitnykh voln [Analysis of the effect of non-linear scattering of electromagnetic waves], *Elektrodinamika i tekhnika SVCh i KVCh* [Electrodynamics and technology VHF and EHF], 1998, Vol. 6, No. 1-2 (21), pp. 119-126.
17. Sievenpiper D.F. Nonlinear Grounded Metasurfaces for Suppression of High-Power Pulsed RF Currents, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2011, 10, pp. 1516-1519. DOI: 10.1109/lawp.2011.2182593.

18. Zhu Z-W, Chen H-Y, Zhang H-B, Zhou P-H, Deng L-J, Xie J-L. Patterned resistive strip loading for edge scattering suppression of a finite wedge, *Prog. Electromagn. Res. M*, 2012, 25, pp. 27-38.
19. Tsikhosh E. Sverkhzvukovye samolety: Spravochnoe rukovodstvo [Supersonic Aircraft: Reference Manual]: transl. from polish. Moscow: Mir, 1983, 432 p.
20. Markov G.T., Chaplin A.F. Vozbuzhdenie elektromagnitnykh voln [Excitation of electromagnetic waves]. Moscow: Izd-vo Radio i svyaz', 1983, 296 p.
21. Baskakov S.I. Radiotekhnicheskie tsepi i signaly [Radio engineering circuits and signals]. Moscow: Izd-vo «Vysshaya shkola», 2000, 459 p.

Статью рекомендовала к опубликованию к.т.н. Н.Н. Кисель.

Семенихина Диана Викторовна – Южный федеральный университет; e-mail: d_semenikhina@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371634; д.т.н.; профессор.

Скотаренко Ярослав Александрович – e-mail: yaroslav.cko@mail.ru; тел.: +79044460124; аспирант.

Semenikhina Diana Viktorovna – Southern Federal University; e-mail: d_semenikhina@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371733; dr. of eng. sc.; professor.

Skotarenko Yaroslav Aleksandrovich – e-mail: yaroslav.cko@mail.ru; phone: +79044460124; post-graduate student.

УДК 004.942, 654.924.56

DOI 10.18522/2311-3103-2024-2-121-132

С. Сингх, А.В. Прибыльский

СИНТЕЗ СИСТЕМЫ СВЕРХБЫСТРОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ПОЖАРООПАСНЫХ СИТУАЦИЙ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСА ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ДАТЧИКОВ

Современные технологии и городская инфраструктура требуют инновационных подходов к обнаружению пожароопасных ситуаций. Эффективное и сверхбыстрое обнаружение возгораний становится неотъемлемой частью обеспечения безопасности. С этой целью синтезируются и реализуются системы способные обнаруживать и информировать об пожароопасной ситуации за считанные секунды, в статье синтезируется одна из таких систем. Исследование и синтез математической модели цифрового универсального пожарного датчика, который в свою очередь является комплексом взаимосвязанных датчиков, актуально в связи с постоянным развитием инфраструктуры систем, возрастающей сложностью электрооборудования и необходимость сокращению ущерба, возникающего при возникновении и распространении пожаров. Предиктивная диагностика работоспособности электрооборудования, позволяет своевременно выявлять и устранять потенциальные угрозы пожарной безопасности. В рамках данного исследования приводится теоретическая математическая модель реального цифрового универсального пожарного датчика, сперва в упрощенном варианте, затем в усложненном с учетом конструкции и статистического подхода к задаче нахождения порогов срабатывания датчика, приведено описание параметров математической модели и последовательного принципа работы. Данный датчик представляет собой инновационное решение в области пожарной безопасности, которое обеспечивает высокий уровень контроля и эффективности в реальном времени. На основе теоретических моделей, представленных в статье, разработана математическая модель датчика, которая смоделирована с использованием программного средства Simulink на реальных данных, полученных от производителя датчика. Результаты моделирования показали, что модель корректно описывает поведение реального датчика на всех каналах и может быть использована в дальнейших исследованиях, таких как прогнозирование и обнаружения пожароопасных ситуаций с использованием нейронных сетей. Синтез предложенной системы необходим для дальнейших исследований в области прогнозирования и обнаружения пожароопасных ситуаций на основе полученной математического модели.

Пожарный датчик; simulink; сигнал детекции; стандартное отклонение; функция активации; математическое моделирование.